

El fundamento físico del
CAMBIO CLIMATICO

William Collins, Robert Colman, James Haywood, Martin R. Manning y Philip W. Mote

¿Por qué están tan seguros los climatólogos de que la actividad humana provoca un calentamiento peligroso de la Tierra?

Algunos de los participantes en la reciente revisión internacional de los datos científicos pertinentes resumen aquí los argumentos y analizan las incertidumbres que quedan por despejar

VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM



TOM DRAPER DESIGN; *de izquierda a derecha:* JOHN McCONNICO *AP Photo;* JAAP HART *iStockPhoto;* ISTOCKPHOTO; MALCOLM ROMAIN *iStockPhoto;* TONY TREMBLAY *iStockPhoto;* ROB HILL *iStockPhoto*

Para quienes estudian el cambio climático, ¡qué raros son los momentos en que pueden exclamar "eureka"! Progresan mediante el penoso ensamblaje de los indicios que reporta cada nueva medición de temperaturas, exploración por satélite o experimento con modelos del clima. La información se comprueba y se vuelve a comprobar; las ideas se contrastan una y otra vez. ¿Se ajustan las observaciones a los cambios predichos? ¿No habrá otra explicación? Como cualquier científico que se precie, el climatólogo quiere asegurarse de que se apliquen los criterios más exigentes a cuanto se descubra en su campo.

Y así, a lo largo de los últimos veinte años, se han acumulado las pruebas —a medida que se multiplicaban los registros climatológicos, mejoraba nuestro conocimiento del sistema climático y aumentaba la fiabilidad de los modelos climatológicos— de que los seres humanos alteran el clima. La comunidad científica ha venido convenciéndose de la realidad del cambio climático reciente y de que en el futuro podrían suceder cambios aún mayores. Esta certidumbre se refleja en el último informe del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (PICC), el cuarto de una serie de documentos, escritos y revisados por cientos de expertos de todo el mundo, que evalúan los conocimientos de que se dispone.

El Panel publicó en febrero una versión condensada de la primera parte del informe, que versaba sobre el fundamento físico del cambio climático. Con el título de "Resumen para responsables públicos", transmitía a éstos y a la ciudadanía en general un mensaje inequívoco: los científicos están más seguros que nunca de que los seres humanos han modificado el clima y de que va a seguir habiendo cambios climáticos causados por la acción humana. Aunque el informe considera que algunos de esos futuros cambios resultan ya inevitables, confirma también que el futuro, especialmente a largo plazo, sigue dependiendo de nosotros: la amplitud de los cambios tendrá que ver con lo que decidamos hacer con las emisiones de gases de efecto invernadero.

La evaluación de los fundamentos físicos se centra en cuatro temas: las causas del cambio climático, los cambios observados en el sistema climático, las relaciones de causa y efecto y la previsión de futuros cambios. Desde la evaluación realizada por el Panel en 2001, se han conseguido importantes avances en todas esas áreas. Iremos aquí exponiendo los principales hallazgos que documentan la amplitud del cambio climático y llevan necesariamente a la conclusión de que es la actividad humana la que lo está provocando.

Factores que impulsan el cambio climático

Debido a la acción humana, han aumentado las concentraciones atmosféricas de muchos gases, en particular el dióxido de carbono, el metano, el óxido nitroso y los halocarburos (gases que en el pasado se usaban como refrigerantes y presurizadores de vaporizadores). Estas sustancias atrapan la energía térmica (el calor) dentro de la atmósfera mediante el efecto invernadero. Llevan así al calentamiento global.

Las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso permanecieron constantes, a grandes rasgos, durante casi 10.000 años, hasta que se produjeron los bruscos y cada vez más rápidos aumentos de los últimos 200 años (*véase el recuadro* "Factores que influyen en el clima"). Las tasas de crecimiento de las concentraciones de dióxido de carbono han sido superiores en los últimos 10 años a las de cualquier otra década desde que, a mediados del siglo XX, empezó a escrutarse la atmósfera de forma continua.

Conceptos básicos

- Los expertos consideran que el hombre ha perturbado el clima, una acción incesante que provocará mayores alteraciones.
- La causa principal de los cambios climáticos recientes estriba en las emisiones de gases de efecto invernadero, procedentes de la actividad humana, especialmente la quema de combustibles fósiles.
- El informe de 2007 del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático considera que la probabilidad de que el cambio climático se deba a la acción humana es del 90 por ciento. El informe anterior, publicado en el año 2001, consideraba que la probabilidad era de más de un 66 por ciento.
- Aunque ya es inevitable que se produzcan nuevos cambios en el clima global, especialmente a largo plazo, la magnitud de los cambios previstos dependerá de lo que el hombre decida hacer con las emisiones de gases de efecto invernadero.



VOCABULARIO

FORZAMIENTO RADIATIVO. Según se usa la expresión en el recuadro "Factores que influyen en el clima", se refiere al cambio en el equilibrio energético de la Tierra desde la época preindustrial hasta el momento actual.

COSTA DEL GOLFO, en 2005; daños por más de 100.000 millones de dólares en 1970; más de 300.000 muertos.

GASES DE EFECTO INVERNADERO DE LARGA DURACION. Incluyen el dióxido de carbono, el metano, el óxido nitroso y los halocarburos. Los aumentos observados de estos gases son el resultado de actividades humanas.

OZONO. Un gas que se encuentra en la atmósfera superior y a ras del suelo. A nivel del suelo es un contaminante. En la parte superior de la atmósfera, protege la vida terrestre de los perniciosos rayos ultravioleta del Sol.

ALBEDO SUPERFICIAL. La reflectividad de la superficie de la Tierra: una superficie más luminosa, como una capa de nieve, refleja más radiaciones solares que otra superficie más oscura.

AEROSOLES. Partículas presentes en el aire generadas por fuentes naturales (polvo, tormentas, incendios forestales, erupciones volcánicas) y artificiales, como la quema de combustibles fósiles.

ESTELAS. Nubes artificiales creadas por los gases de escape de los motores de los aviones.

TROPOSFERA. La capa de la atmósfera más cercana a la Tierra. Abarca desde el nivel del mar hasta unos 12 kilómetros de altitud.

ESTRATOSFERA. Se encuentra inmediatamente por encima de la troposfera y abarca unos 50 kilómetros por encima de ella.

Las concentraciones actuales se cifran en torno a un 35 por ciento superiores a las preindustriales (que pueden determinarse por las burbujas de aire atrapadas en las muestras de los glaciares). Los niveles de metano son unas dos veces y media más altos que los preindustriales, y los de óxido nitroso han aumentado en un 20 por ciento, más o menos.

¿Cómo podemos estar seguros de que los seres humanos somos responsables de estos incrementos? Algunos gases de efecto invernadero (como los halocarburos) no se producen en la naturaleza. En el caso de otros gases, hay dos datos importantes que demuestran la influencia humana. En primer lugar, las variaciones geográficas de la concentración revelan que las fuentes se encuentran principalmente en tierra y en el hemisferio norte, más densamente poblado. En segundo lugar, el análisis de isótopos, que puede distinguir las diferentes fuentes de emisiones, demuestra que el aumento del dióxido de carbono proviene, en su mayor parte, de la utilización de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural). Los aumentos del metano y el óxido nitroso se derivan de las prácticas agrícolas y de los combustibles fósiles.

Los climatólogos recurren a la noción de forzamiento radiativo para cuantificar los efectos en el clima de esas concentraciones crecidas. El forzamiento radiativo es el cambio causado en el equilibrio global de energía de la Tierra con respecto a la época preindustrial (se suele expresar en watt por metro cuadrado). Un forzamiento positivo induce calentamiento; uno negativo, enfriamiento. Podemos determinar de forma bastante exacta el forzamiento radiativo asociado a los gases de efecto invernadero de larga duración, pues conocemos sus concentraciones atmosféricas, su distribución espacial y los principios físicos que regulan su interacción con la radiación.

El cambio climático no está provocado sólo por el aumento en las concentraciones de gases de efecto invernadero. Intervienen también otros mecanismos, naturales y antropogénicos. Entre las causas naturales se encuentran los cambios de la actividad solar y las grandes erupciones volcánicas. El informe expone varios mecanismos de forzamiento adicionales, y significativos, que hay que atribuir, igual que las emisiones de gases, al hombre (aerosoles —partículas microscópicas—, el ozono estratosférico y troposférico, la alteración del albedo superficial —la reflectividad— y las estelas de los aviones), si bien es mucho mayor la incertidumbre acerca de su influencia que en el caso de los gases de invernadero (*véase el recuadro* "Factores que influyen en el clima").

Existen dudas en torno a las consecuencias climáticas de la modificación del albedo de las nubes por los aerosoles generados por actividades humanas: sus complejas interacciones con las nubes aumentan el brillo de éstas, que reflejan entonces más luz solar hacia el espacio. Otra fuente de incertidumbre proviene del efecto directo de los aerosoles antropogénicos: como partículas, ¿en qué cuantía reflejan y absorben directamente la luz solar? En general, estos efectos de los aerosoles tienden a producir un enfriamiento que compensaría, en parte, el calentamiento debido a los gases de efecto invernadero de larga duración. Pero, ¿en qué medida? ¿Podrían llegar a neutralizar el calentamiento?

Uno de los avances habidos desde el informe del PICC de 2001 es la cuantificación, mediante la combinación de los resultados de multitud de modelos y observaciones, de la incertidumbre asociada a cada tipo de forzamiento. En consecuencia, ahora ya podemos evaluar el efecto humano total. Nuestra estimación más probable decuplica, *grosso modo*, la estimación más probable del forzamiento radiativo natural atribuible a los cambios de actividad solar.

Este grado más alto de certeza de un forzamiento radiativo neto positivo se adecua muy bien a los datos experimentales del calentamiento que analizaremos a continuación. Cabe

TOM DRAPER DESIGN; ISTOCKPHOTO; MIGUEL ANGELO SILVA *iStockPhoto*; DLILLC *Corbis*; EMILY HARRISON; DAVID WOODS *iStockPhoto*; BEN CONLAN *iStockPhoto*; BETTMANN/CORBIS; ANNA PUSTOVAYA *iStockPhoto*; NOAA; ISTOCKPHOTO; HEIKO BENNEWITZ *iStockPhoto*



imaginar los forzamientos como un tira y afloja donde los de signo positivo llevan a la Tierra hacia un clima más cálido y los de signo negativo hacia un estado más frío. Ahora que conocemos la fuerza de los competidores mucho mejor que antes, sabemos que hay un ganador, y con gran ventaja: la Tierra se está viendo arrastrada hacia un clima más cálido, proceso que cobrará mayor intensidad conforme vaya aumentando el calentamiento por efecto invernadero.

Cambios climáticos observados

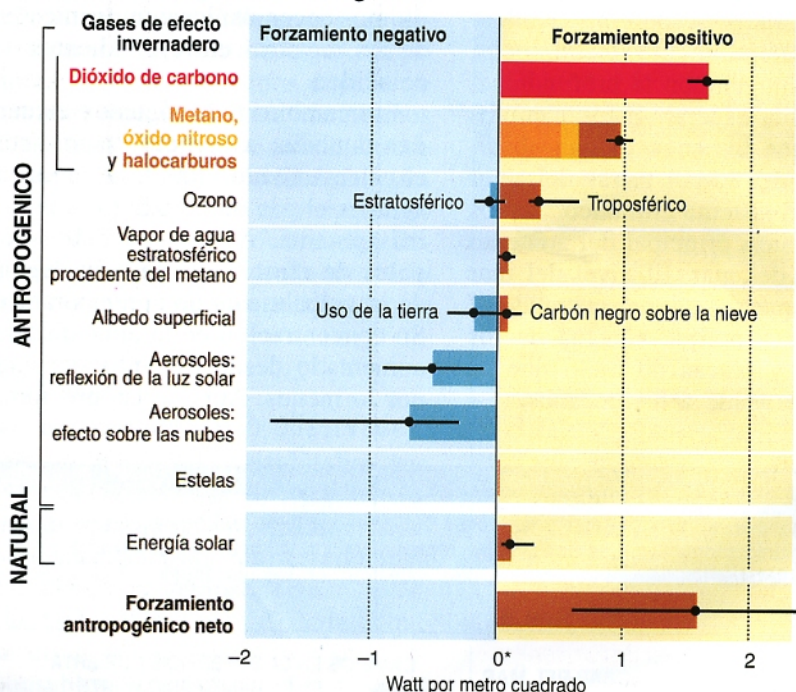
Los numerosos datos experimentales, depurados, entonces disponibles para el informe PICC 2007 permitieron una evaluación más general de los cambios que en informes anteriores. Los registros experimentales indican que 11 de los 12 últimos años son los más cálidos desde que hay datos fiables, es decir, desde 1850 más o menos. La probabilidad de que esos años más cálidos sean consecutivos por pura casualidad es pequeñísima. Los cambios de cantidades importantes —la temperatura global, el nivel del mar y la capa de nieve en el hemisferio norte (*véase el recuadro* "Datos experimentales")— muestran en todos los casos indicios de calentamiento, aunque difieren los detalles.

La anterior evaluación del PICC estimaba una tendencia hacia el calentamiento de 0,6 ± 0,2 grados centígrados en el período de 1901 a 2000. Debido al calentamiento reciente más acentuado, la tendencia actualizada entre 1906 y 2005 es ahora de 0,74 ± 0,18 grados centígrados. Hay que tener en cuenta que sólo el calentamiento entre 1956 y 2005 es ya de 0,65 ± 0,15 grados centígrados, lo que implica que la mayor parte del calentamiento del siglo XX se produjo en los últimos 50 años. Por supuesto, el clima sigue variando en torno a las medias incrementadas; los extremos han cambiado de acuerdo con el cambio de esas medias: los días con mínimas debajo de cero grados y los días y noches de frío se han hecho menos comunes, mientras que

FACTORES QUE INFLUYEN EN EL CLIMA

Un tira y afloja entre los forzamientos positivos (influencias que provocan el calentamiento climático) y los forzamientos negativos (que provocan el enfriamiento) resulta en una "victoria" rotunda de los forzamientos inducidos por la actividad humana que provocan calentamiento (*gráfico de la izquierda*). Los forzamientos dominantes inducidos por la actividad humana provienen de los gases de efecto invernadero de larga vida presentes en la atmósfera, cuyas concentraciones han aumentado mucho en los últimos 200 años.

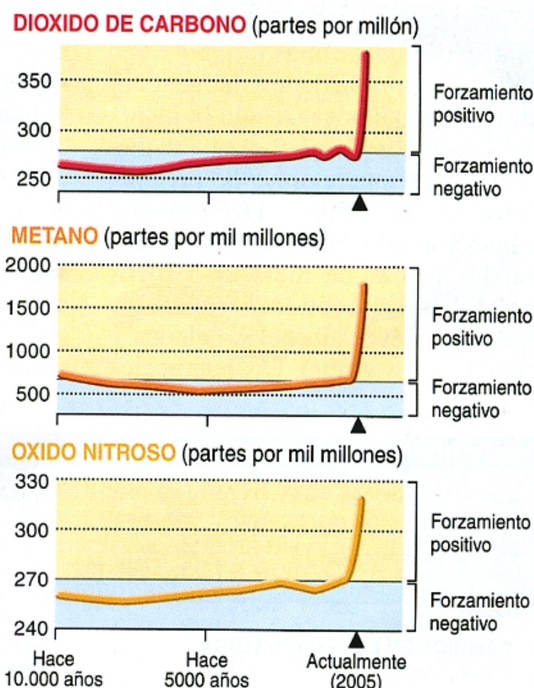
Forzamiento radiativo: visión general



*El cero representa el equilibrio de energía preindustrial.

Se muestran las estimaciones para 2005 de las medias globales del forzamiento radiativo atribuible a los principales mecanismos. Las barras negras de error indican el nivel de incertidumbre asociado a cada forzamiento: existe una probabilidad del 90 por ciento de que los valores caigan dentro de las barras de error. El forzamiento radiativo de los gases de efecto invernadero, por ejemplo, tiene un alto grado de certeza, mientras que hay una gran incertidumbre asociada a los efectos de los aerosoles. (Los aerosoles volcánicos no se incluyen en el gráfico, debido a su condición de acontecimientos esporádicos.)

Gases de efecto invernadero: los forzamientos principales



Las concentraciones de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso del pasado se dedujeron del hielo de los glaciares; las de tiempos recientes vienen de muestras atmosféricas. Los grandes aumentos recientes pueden atribuirse a las actividades humanas.

DANIELA NAOMI MOLNAR (*gráficas*)





Hielo marino en el Artico, 1979



Hielo marino en el Artico, 2005

las olas de calor y los días y noches cálidos menudean más.

Entre las propiedades del sistema climático estudiadas no sólo se incluyen conceptos familiares, como las medias de temperatura o de precipitaciones, sino también el estado del océano y la criosfera (mares de hielo, grandes placas de hielo en Groenlandia y en el continente antártico, glaciares, nieve, subsuelos helados y hielo de lagos y ríos). Las interacciones complejas entre distintas partes del sistema climático constituyen un elemento fundamental del cambio climático. Por mor de ejemplo, la reducción del hielo marino aumenta la absorción de calor por parte de los océanos y el flujo de calor entre los océanos y la atmósfera, lo que repercute en la nubosidad y las precipitaciones.

Un gran número de observaciones adicionales concuerdan, a grandes rasgos, con el calentamiento observado y reflejan un flujo de calor desde la atmósfera hacia otros componentes del sistema climático. La capa de nieve primaveral, que disminuye a medida que aumentan las temperaturas vernales en las latitudes medias del hemisferio norte, decreció bruscamente en torno a 1988 y ha permanecido en un nivel muy bajo desde entonces. Esta disminución es preocupante, porque la capa de nieve cuenta mucho en la humedad del suelo y los recursos hídricos de vastas zonas de la Tierra.

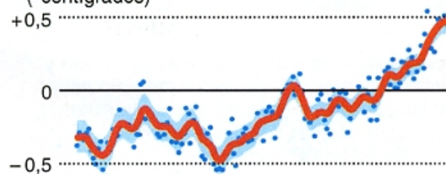
En los mares se perciben tendencias al calentamiento inequívocas, que disminuyen con la profundidad, según cabía esperar. Estos cambios indican que los océanos han absorbido más del 80 por ciento del calor añadido al sistema climático. Vemos ahí una causa principal del aumento del nivel del mar. El nivel del mar sube porque su agua se expande al calentarse y porque el agua de los glaciares y placas de hielo que se funden se añade a los océanos.

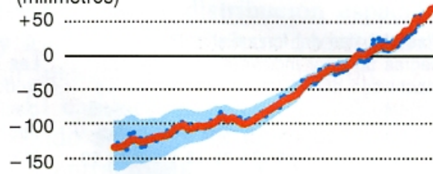
Desde 1993, las observaciones de los satélites han permitido cálculos más precisos del aumento del nivel del mar, que actualmente se estima en 3,1 ± 0,7 milímetros al año desde 1993 hasta 2003. Decenios pasados mostraron crecimientos igualmente rápidos, de modo que se necesitarán datos tomados por satélites a lo largo de períodos más prolongados para determinar de forma inequívoca si se está acelerando el aumento del nivel del mar. En las últimas décadas se han observado reducciones sustanciales de la extensión del hielo del mar Artico (desde 1978, 2,7 ± 0,6 por ciento por década de media anual, 7,4 ± 2,4 por ciento por década para el verano), aumentos de las temperaturas de los subsuelos permanentemente helados (el *permafrost*) y reducciones de la extensión de las capas de hielo en todo el mundo, en particular en Groenlandia y en el continente antártico. Desgraciadamente, no hubo una medición adecuada de tales magnitudes hasta los últimos decenios; los puntos iniciales de los registros correspondientes no coinciden.

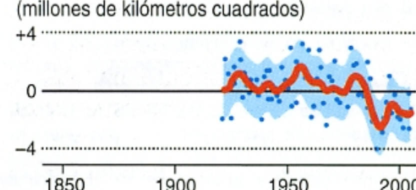
Los cambios hidrológicos concuerdan también, a grandes rasgos, con el calentamiento global. El vapor de agua es el gas de efecto invernadero más potente. A diferencia de otros gases de efecto invernadero, depende principalmente de la temperatura. Su concentración en la atmósfera ha aumentado desde los años ochenta, por lo menos. Aunque las precipita-

DATOS EXPERIMENTALES

Las observaciones de la temperatura media superficial mundial, el nivel del mar y las zonas cubiertas de nieve del hemisferio norte, en los meses de marzo y abril, documentan un calentamiento progresivo. Las líneas rojas representan los valores medios en una década, mientras que el sombreado azul indica el rango de incertidumbre; los puntos azules muestran los valores anuales. Todas las mediciones son relativas al período 1961-1990.







NASA GODDARD SPACEFLIGHT CENTER SCIENTIFICA VISUALIZATION STUDIO (*imágenes del Artico helado*); TOM DRAPER DESIGN; STEPHEN STRATHDEE *iStockPhoto*; ISTOCKPHOTO;
MARTIN BOND *Photo Researchers, Inc.*; BETTMANN/CORBIS; NICK TZOLOV *iStockPhoto*; JEREMY EDWARDS *iStockPhoto*; ISTOCKPHOTO; HASAN KURSAD ERGAN *iStockPhoto*;



ciones son muy variables a pequeña escala, puede establecerse que han aumentado en grandes regiones del mundo: parte oriental de Norteamérica y Sudamérica, parte septentrional de Europa y Asia central y del norte. Se ha observado, en cambio, un desecamiento del Sahel, del Mediterráneo, del sur de Africa y de algunas zonas de Asia meridional.

La salinidad de los océanos vale como pluviómetro poderoso. Las aguas cercanas a la superficie de los océanos se han hecho más dulces en latitudes altas y medias, mientras que en las latitudes inferiores se han vuelto más saladas, de acuerdo con las modificaciones de los patrones a gran escala de las precipitaciones.

Las reconstrucciones de las condiciones climatológicas del pasado —el paleoclima— a partir de los anillos de los árboles y de otros indicios proporcionan un conocimiento adicional importante de la forma en que funciona el sistema climático con y sin la influencia del hombre. Estas reconstrucciones indican que el calentamiento del último medio siglo no es habitual, al menos cuando se compara ese lapso con los últimos 1300 años. El período más caluroso entre los años 700 y 1950 de nuestra era —probablemente el transcurrido entre 950 y 1100— fue varias décimas de grado centígrado más frío que las temperaturas medias entre 1980 y hoy.

Atribución del cambio climático observado

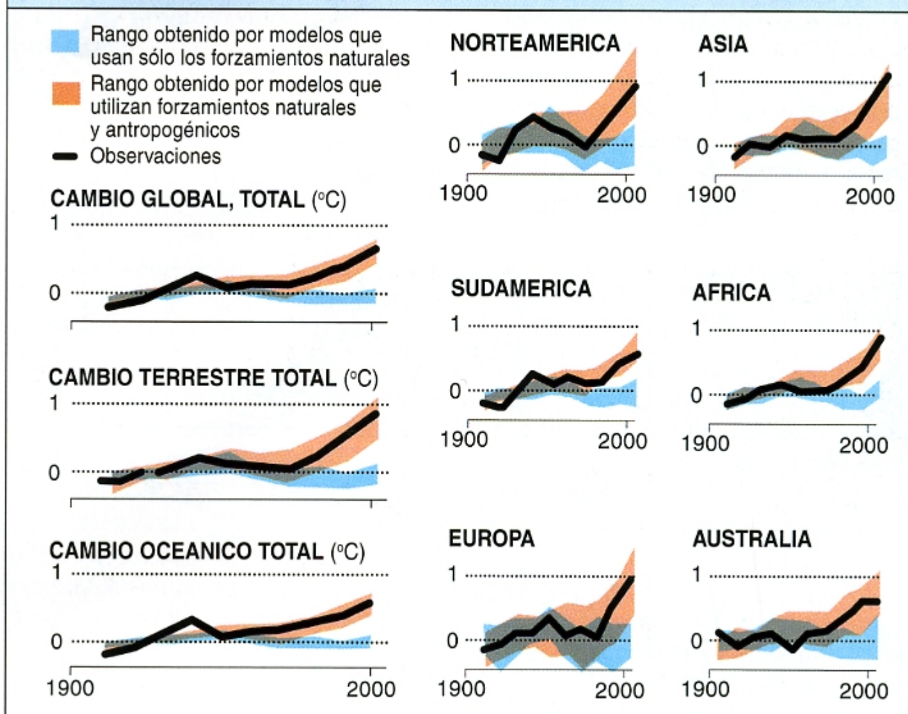
Pese a la fundada certidumbre que se tiene de que las actividades humanas aportan un forzamiento radiativo positivo y de que el clima ha cambiado, ¿podemos vincular ambas cuestiones? Hay que dirimir a qué se atribuye lo que se ve: ¿son responsables principales de los cambios climáticos observados las actividades humanas? ¿No habrá otras causas, como algún forzamiento natural o, simplemente, la variación espontánea del sistema climático? El informe de 2001 del PICC llegó a la conclusión de que era *probable* (con más de un 66 por ciento de probabilidad) que la mayor parte del calentamiento desde mediados del siglo XX fuera atribuible al hombre. El informe de 2007 va significativamente más allá, aumentando el grado de certeza a *muy probable* (más de un 90 por ciento de probabilidad).

La razón de esa mayor certeza proviene de una multitud de avances. De entrada, contamos con cinco años más de datos procedentes de la observación; el aumento global de la temperatura durante ese período se ha ajustado, en líneas generales, a las previsiones del calentamiento provocado por los gases de efecto invernadero incluidas en los informes que el PICC ha ido publicando desde 1990. Además, se han tomado en consideración los cambios de otros aspectos del clima, como la circulación atmosférica o las temperaturas en el interior de los océanos. Se ha confeccionado así un cuadro coherente, y más amplio, de la intervención humana. Se han refinado los modelos climáticos, esenciales a la hora de atribuir causas; ahora representan el clima actual y el del pasado reciente con una precisión considerable. Por último, algunas discrepancias de importancia en los datos experimentales se han ido despejando en buena medida en los cinco años transcurridos desde el penúltimo informe.

La más importante de esas discrepancias era una diferencia entre el registro instrumental de las temperaturas superficiales (que mostraba un calentamiento significativo en las últimas décadas, en consonancia con el impacto de las actividades humanas) y el registro de los datos de los globos y satélites atmosféricos (que mostraban escasos indicios del calentamiento previsto). Varios nuevos estudios de los datos de globos y satélites han resuelto esta anomalía; ahora se aprecia un calentamiento general en la superficie y en la atmósfera.

CAMBIO DE TEMPERATURA PROVOCADO POR LOS SERES HUMANOS

Los modelos que utilizan solamente forzamientos naturales (*azules*) no reflejan los incrementos actuales de la temperatura. Sin embargo, cuando se tienen en cuenta los forzamientos naturales y los provocados por el hombre (*naranjas*), los modelos reproducen la subida real de la temperatura, tanto a escala mundial como a escala continental. Los cambios que se muestran son relativos a la media entre 1901-1950.



LUCY READING-IKKANDA (*gráficas*)



No habría mejor manera de estudiar las causas del cambio climático que repetir en el mundo real la historia del clima del siglo XX, pero con una concentración constante (en lugar de creciente) de gases de efecto invernadero. Por supuesto, es un experimento imposible. De ahí que se haya elegido la segunda mejor opción: simular el pasado con modelos climáticos.

Dos avances reseñables desde la última evaluación del PICC han aumentado la confianza en el uso de modelos tanto para la atribución de causas como para la previsión de cambios climáticos. Se refiere el primero a la realización de un conjunto exhaustivo, estrechamente coordinado, de simulaciones de la evolución histórica y futura del clima terrestre por 18 grupos, de diversos países, que confeccionan modelos. Usar muchos modelos ayuda a cuantificar el efecto de las incertidumbres acerca de diversos procesos climáticos en los abanicos de resultados de los modelos. Aunque algunos procesos se entienden bien y se representan adecuadamente mediante ecuaciones (el flujo de la atmósfera y del océano o la propagación de la luz solar y del calor, por ejemplo), ciertos componentes esenciales del sistema climático, como las nubes, los remolinos marinos y la transpiración de los vegetales, se conocen peor.

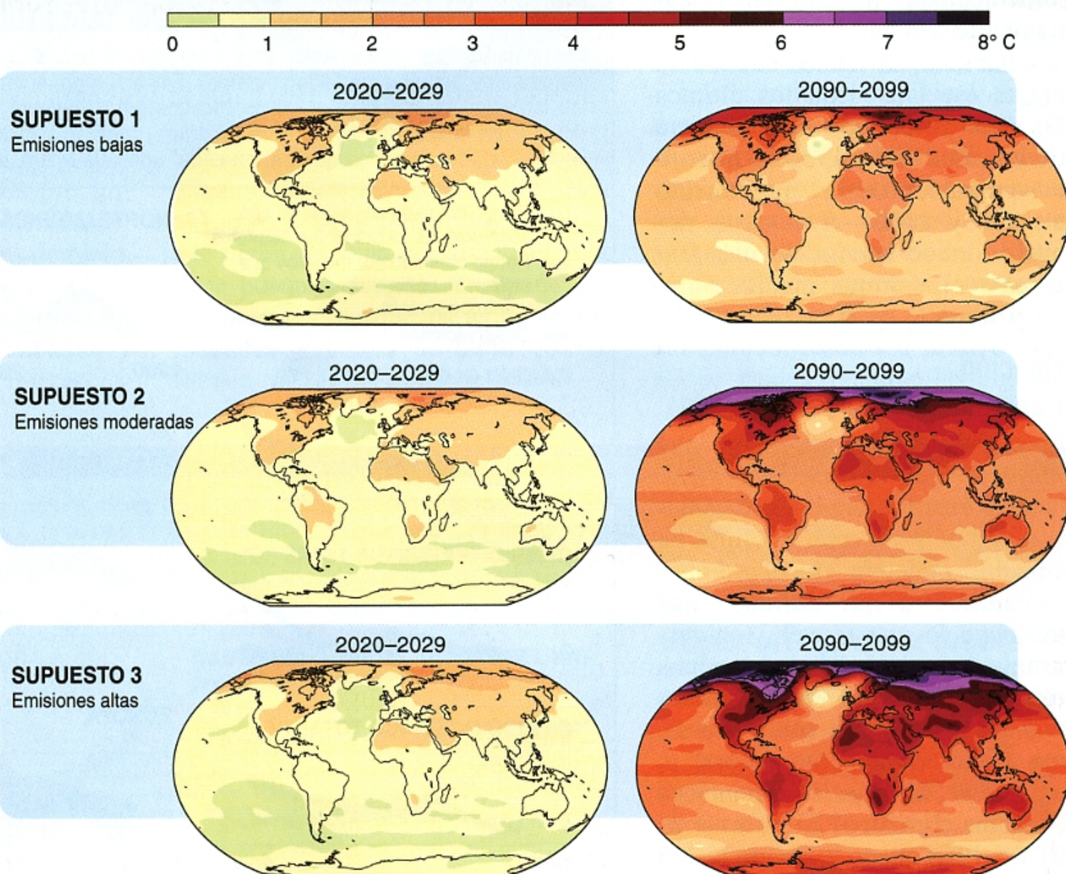
Los creadores de modelos efectúan aproximaciones de los componentes mal conocidos mediante representaciones simplificadas, las llamadas parametrizaciones. El deseo de establecer cómo afectan tales incertidumbres a la atribución de causas y predicción del cambio climático es la principal razón de que se recurra a un conjunto de múltiples modelos para las evaluaciones del PICC. El conjunto de modelos utilizado para la última evaluación descuella por el abultado número de modelos y de experimentos realizados.

El segundo avance consiste en la incorporación de representaciones más realistas de ciertos procesos climáticos en los modelos: del comportamiento de los aerosoles atmosféricos, de la dinámica (el movimiento) del hielo marino, del intercambio de agua y energía entre la tierra y la atmósfera. Un número mayor de modelos incluye ahora los principales tipos de aerosoles y las interacciones entre aerosoles y nubes.

Cuando se utilizan los modelos climáticos para atribuir causas, primero se realizan simulaciones mediante modelos que sólo tienen en cuenta las influencias "naturales" sobre el clima de los últimos 100 años; por ejemplo, los cambios en la irradiación solar y las principales erupciones volcánicas. Después, se utilizan modelos que incluyen los aumentos inducidos por el hombre en

CAMBIOS DE TEMPERATURA PREVISTOS

Se calcularon los cambios previstos de la temperatura superficial (relativos al período 1980-1999), basados en 22 modelos de 17 programas diferentes, para tres supuestos socioeconómicos. Los tres supuestos se basan en estudios realizados antes del año 2000 y no prevén ninguna política climática adicional; en otras palabras, no incluyen mitigación alguna.



DANIELA NAOMI MOLNAR; FUENTE: *CLIMATE CHANGE 2007: THE SCIENTIFIC BASIS, SUMMARY FOR POLICYMAKERS*, INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (*mapas*); TOM DRAPER DESIGN; ISTOCKPHOTO; TY MILFORD *Aurora Photos*; LINDSAY HEBBERD *Corbis*; BILDERBUCH *Design Pics/Corbis*; DANIEL STEIN *iStockPhoto*; OLEG FEDORENKO *iStockPhoto*; PETER ESSICK *Aurora Photos*; SHAUN LOWE *iStockPhoto*; BURCU ARAT SUP *iStockPhoto*



los niveles de gases de efecto invernadero y de aerosoles. Los resultados son sorprendentes. Los modelos que sólo comprenden los forzamientos naturales son incapaces de explicar el calentamiento global observado desde mediados del siglo XX; en cambio, lo logran cuando, además de los factores naturales, incluyen los antropogénicos. Los patrones a gran escala de los cambios de temperatura de los distintos modelos son también más congruentes entre sí cuando se incluyen todos los forzamientos.

Dos pautas señalan con claridad la influencia humana. La primera consiste en que el calentamiento sea mayor sobre el continente que sobre el océano y mayor en la superficie del mar que en las capas profundas. Este patrón se ajusta bien a un calentamiento, inducido por gases de efecto invernadero, por efecto de la atmósfera suprayacente: el agua se calienta más despacio a causa de su elevada inercia térmica. El calentamiento indica también que los océanos están absorbiendo una gran cantidad de calor; se demuestra así que el balance energético del planeta se ha desequilibrado.

La segunda pauta consiste en que la troposfera (la parte inferior de la atmósfera) se ha calentado, mientras que la estratosfera, justo encima de ella, se ha enfriado. Si los cambios solares fueran la causa dominante del forzamiento, ambas capas atmosféricas deberían calentarse. Sin embargo, el contraste observado es el que se esperaría de la combinación del aumento de los gases de efecto invernadero con la disminución del ozono estratosférico.

En estos datos generales, sometidos a cuidadosos análisis estadísticos, se fundamenta esa mayor certidumbre que ahora se tiene en que es la acción humana lo que está provocando el calentamiento global observado. La hipótesis de que los rayos cósmicos podrían afectar a las nubes y, por lo tanto, al clima, se basaba en correlaciones sacadas de registros históricos limitados que, contrastadas con datos adicionales, no se han mantenido en pie. Además, el mecanismo físico se sigue moviendo en el terreno de la especulación.

¿Qué sucede a escalas más pequeñas? Conforme van decreciendo las escalas espacial y temporal, la atribución del cambio climático resulta más difícil: las variaciones naturales de las temperaturas a pequeña escala no están tan promediadas y, por lo tanto, enmascaran con mayor facilidad las señales del cambio. Sin embargo, con un calentamiento continuo la señal acaba también por aflorar a pequeña escala. El informe sostiene que la actividad humana ha influido probablemente en la temperatura incluso a escala continental y, además, en todos los continentes, excepto en la Antártida.

Las influencias humanas se perciben, asimismo, en sucesos extremos; tales, las noches inusualmente calurosas o frías y la aparición de olas de calor. Por supuesto, eso no significa que cada suceso extremo (como la ola de calor europea del año 2003) tenga por "causa" exclusiva el cambio climático inducido por el hombre. Los sucesos extremos, siempre complejos, obedecen a múltiples causas. Pero sí significa que la acción humana hubo de alterar las *probabilidades* de que se produzcan.

Previsiones de futuros cambios climáticos

¿Qué derrota seguirá el clima a lo largo del siglo XXI? Se intenta responder a cuestión tan crucial a través de simulaciones con modelos climáticos que se basan en previsiones de las emisiones futuras de aerosoles y gases de efecto invernadero. Según las simulaciones, con emisiones de gases de efecto invernadero similares o superiores a las actuales los cambios climáticos serán, muy probablemente, superiores a los ya observados durante el siglo XX. Aun cuando las emisiones se redujesen, de forma inmediata y lo suficiente como para estabilizar las concentraciones de gases de efecto invernadero en los niveles actuales, el cambio climático seguiría produciéndose durante siglos. Semejante inercia del clima es consecuencia de una combinación de factores, entre ellos la capacidad calorífica de los océanos y los milenios necesarios para que la circulación mezcle el calor y el dióxido de carbono en sus profundidades hasta que se alcance el equilibrio.

En concreto, los modelos prevén que, en los próximos 20 años, para una gama de emisiones verosímiles,

LA FORMA DE ACTUAR DEL PICC

El PICC fue creado por los gobiernos en 1988 para que llevase a cabo evaluaciones de la información científica y técnica disponible sobre el cambio climático. Se espera que el procedimiento utilizado para la elaboración de estas evaluaciones les asegure un alto nivel de credibilidad.

Se han publicado evaluaciones muy completas en 1990, 1995, 2001 y 2007.

Tres "grupos de trabajo" separados examinan los fundamentos físicos del cambio climático, sus efectos sobre la naturaleza y la sociedad y los métodos para mitigarlo.

Los gobiernos nombran a los autores principales entre quienes llevan a cabo investigaciones pertinentes. Se intenta equilibrar cuidadosamente los distintos puntos de vista, así como la geografía, el sexo y la edad.

Un procedimiento de revisión contrasta las evaluaciones de los autores con las opiniones de los demás expertos. Más de 600 expertos revisaron el informe del Grupo de Trabajo I, en el que está basado este artículo. Aportaron más de 30.000 comentarios.

Cada uno de los tres grupos de trabajo emite también un "Resumen para Políticos", redactado en colaboración con los delegados de los gobiernos, para asegurar que el lenguaje utilizado resulte claro para los responsables públicos.

LAS CONSECUENCIAS DEL AVANCE DEL CALENTAMIENTO

El calentamiento global es real y, tal como afirmó el Grupo de Trabajo I del PICC en su informe de enero-febrero de 2007, parece "muy probable" que se deba, en buena medida, a la acción del hombre del último medio siglo, como mínimo. Pero, ¿tan importante es ese calentamiento como para plantear un verdadero problema? De responder a la pregunta se encargó el Grupo de Trabajo II, un equipo internacional de científicos que se centraron en la vulnerabilidad de los entornos naturales y humanos al cambio climático.

En el resumen de sus conclusiones de abril de 2007, el Grupo de Trabajo II determinó que el calentamiento inducido por el hombre en las tres últimas décadas y media ha tenido una influencia discernible en muchos sistemas físicos y biológicos. Los datos experimentales de todos los continentes y de la mayoría de los océanos muestran que muchos sistemas naturales sufren los cambios climáticos regionales, especialmente por la subida de la temperatura. Los subsuelos permanentemente congelados se está haciendo cada vez más inestables, las avalanchas rocosas de las zonas de montaña abundan cada vez más, las hojas de los árboles brotan antes y algunos animales y plantas se están desplazando hacia latitudes o altitudes superiores.

Mirando hacia el futuro, el grupo predijo también que los cambios climáticos que se están produciendo afectarían a la salud y al bienestar de millones de personas en todo el mundo. La gravedad de los efectos dependerá del nivel de calentamiento que se produzca. Entre las consecuencias más probables se encuentran las siguientes:

- Olas de calor, sequías, incendios, inundaciones costeras y tormentas más frecuentes harán que aumente el número de muertes, lesiones y enfermedades asociadas a esas situaciones.
- Algunas enfermedades infecciosas, como la malaria, se extenderán a nuevas regiones.
- Las altas concentraciones de ozono al nivel del suelo agravarán las dolencias cardiacas y respiratorias.
- En torno al año 2080, el aumento del nivel del mar inundará las casas y propiedades de millones de personas, especialmente en los grandes deltas de Asia y Africa y en las islas pequeñas.

Los efectos nocivos de estos cambios serán más graves para las poblaciones pobres, que suelen depender en mayor grado de recursos sensibles al clima, como el agua y la comida locales y cuya capacidad de adaptación, por definición, está económicamente limitada.

Los efectos del calentamiento global no serían universalmente negativos, sobre todo en los próximos decenios. Por ejemplo, si bien temperaturas más altas perjudicarían bastante pronto la producción de cereales importantes en las naciones ecuatoriales, durante un tiempo aumentarían también la productividad en los países de latitudes altas o medias, como los Estados Unidos. Sin embargo, una vez que la subida de la temperatura superase los tres grados centígrados, se produciría un declive de la agricultura también en esas zonas, a no ser que se acometieran adaptaciones generalizadas.

América Central y Meridional

- Sustitución gradual de las selvas tropicales por sabana en la Amazonia oriental
- Sustitución de la vegetación semiárida por vegetación de tierras áridas
- Extinciones de especies en muchas áreas tropicales
- Reducción de la disponibilidad del agua
- Pérdida de tierras de cultivo en áreas más secas
- Disminución del rendimiento de algunas cosechas importantes
- Reducción de la productividad del ganado

LO QUE HAY QUE HACER

El hombre tiene dos formas de reaccionar ante el cambio climático: mediante la adaptación y mediante la mitigación. La adaptación implica aprender a sobrevivir y prosperar en un mundo más cálido. La mitigación implica limitar la amplitud del calentamiento futuro, reduciendo la liberación neta de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Dado que las temperaturas crecientes están a la orden del día y que un incremento ilimitado resultaría insoportable, será esencial combinar la adaptación y la mitigación. Desgraciadamente, los desacuerdos sobre la factibilidad, los costes y la necesidad de la mitigación han retrasado hasta ahora la respuesta mundial.

A la hora de determinar estrategias de mitigación, con sus costes, el Grupo de Trabajo III del PICC tuvo en cuenta en su informe de 2007 varias estimaciones de la expansión económica, el crecimiento demográfico y la quema de combustibles fósiles. Para los seis supuestos resultantes se predicen concentraciones atmosféricas de equivalentes de dióxido de carbono (es decir, dando las concentraciones de aerosoles y gases de efecto invernadero por medio de las de dióxido de carbono que producirían el mismo efecto) que van de 445 partes por millón (ppm) a 1130 ppm, con los correspondientes aumentos de la temperatura de entre 2,0 y 6,1 grados centígrados por encima de los niveles preindustriales. Para que el aumento de la temperatura no sobrepase la previsión más baja de las mencionadas, el grupo estima que el mundo debería estabilizar los gases atmosféricos de efecto invernadero en 445 ppm en el año 2015 (las concentraciones actuales se acercan a 400 ppm). Se cree que cualquier temperatura superior podría desencadenar graves inundaciones en unos lugares y graves sequías en otros, hacer desaparecer especies enteras y crear el caos económico.

El informe del grupo estudia con detalle las técnicas y las políticas más prometedoras para mantener los gases en 445 ppm. Subraya la importancia de mejorar la eficacia energética de los edificios y vehículos, el cambio a las energías renovables y la conservación de los bosques como "sumideros para el dióxido de carbono". Las políticas incluyen el establecimiento de un objetivo para las emisiones globales y límites, impuestos, incentivos y derechos de emisión negociables.

Sin embargo, los científicos del PICC realizaron su evaluación antes de la aparición, el pasado abril, en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA,* de un artículo que sostiene que las emisiones mundiales de dióxido de carbono entre los años 2000 y 2004 aumentaron tres veces más rápido que en la década de los noventa: han pasado de crecer a un 1,1 por ciento anual a hacerlo a un 3,2. En otras palabras, las emisiones globales reales han crecido desde el año 2000 con una celeridad superior a la prevista en los peores supuestos del PICC. La situación sería, pues, incluso más grave que en las sombrías previsiones de las evaluaciones del Panel.

DANIELA NAOMI MOLNAR (*mapa*); FUERTE: UNIVERSITY CORPORATION FOR ATMOSPHERIC RESEARCH (UCA) Y IPCC

Una visión regional

Las listas incluidas indican algunos de los efectos perturbadores, además de los enumerados en la página anterior, que el Grupo de Trabajo II prevé que se van a producir en varias partes del mundo en el próximo siglo. El grupo asigna a la mayoría de estas predicciones una probabilidad alta o muy alta. Pueden encontrarse más detalles en www.ucar.edu/news/features/climatechange/regionalimpacts.jsp y en la página web del PICC (www.ipcc.ch).

Norteamérica

- En las montañas occidentales, una menor cantidad de nieve, más inundaciones invernales y reducción de los flujos veraniegos
- Ampliación del período de grandes riesgos de incendios y crecimiento de las áreas quemadas
- Aumento de la intensidad, duración y número de las olas de calor en ciudades que históricamente sean susceptibles a las mismas
- En las áreas costeras, aumento de la presión sobre personas y propiedades, a medida que el clima interaccione con el desarrollo y la polución

Europa

- Aumento del riesgo de inundaciones repentinas tierra adentro
- En el sur, más olas de calor con efectos dañinos para la salud, incendios más frecuentes, menor disponibilidad del agua y disminución del potencial hidroeléctrico, cosechas amenazadas y reducción del turismo veraniego
- En las áreas central y oriental, más olas de calor peligrosas para la salud e incendios de turberas, y una reducción de las precipitaciones en verano y de la productividad de los bosques
- En el norte, los efectos negativos a la larga sobrepasarán a los efectos beneficiosos iniciales (una disminución de la demanda de calefacción y un aumento de la productividad agrícola y del crecimiento forestal)

Asia

- Aumento de las inundaciones, avalanchas rocosas y perturbación de los recursos hídricos a medida que se vayan derritiendo los glaciares del Himalaya
- Riesgo continuado de hambrunas en varias regiones en desarrollo, debido a la disminución de la productividad de las cosechas, en combinación con el rápido crecimiento demográfico y la urbanización

Australia y Nueva Zelanda

- Aumento de los problemas del suministro de agua en el sur y el este de Australia y en partes de Nueva Zelanda hacia el año 2030
- Nuevas pérdidas de biodiversidad en lugares ecológicamente ricos hacia 2020
- Aumento de la intensidad y la frecuencia de las tormentas en varios lugares

Islas de pequeño tamaño

- Infraestructuras, establecimientos y asentamientos de importancia vital estarán amenazados por el aumento del nivel del mar
- Disminución de los recursos hídricos en muchos lugares para mediados de siglo
- Erosión de las playas, descoloramiento del coral y otros deterioros del estado de las costas, que perjudicarán a la pesca y al turismo
- Invasión por especies no autóctonas, especialmente en las islas de latitudes medias y altas

Regiones polares

- Los glaciares y las capas de hielo perderán grosor y extensión
- Cambios en la extensión del hielo marino del Artico y de los subsuelos permanentemente congelados
- Deshielo estacional más profundo de los subsuelos permanentemente congelados

Africa

- Disminución de la disponibilidad del agua hacia 2020 para 75–250 millones de personas
- Pérdida de tierras cultivables, reducción de las estaciones de crecimiento y reducción de la productividad en algunas áreas
- Disminución de las poblaciones de peces en los grandes lagos

la temperatura global aumentará a una tasa media de unos 0,2 grados centígrados por década, cerca de la tasa observada en los últimos 30 años. Aproximadamente la mitad de este calentamiento a corto plazo corresponde a la "promesa" de futuros cambios climáticos, consecuencia de la inercia con que el sistema climático reacciona a las concentraciones atmosféricas actuales de gases de efecto invernadero.

Por el contrario, el calentamiento a largo plazo, durante el siglo XXI, dependerá de manera muy especial de la futura tasa de emisiones. Las previsiones cubren una amplia variedad de situaciones, de un crecimiento económico muy rápido a un crecimiento modesto, y de una mayor a una menor dependencia de los combustibles fósiles. Las estimaciones más probables del aumento de las temperaturas globales van de los 1,8 a los 4,0 grados centígrados según la evolución de las emisiones, siendo las emisiones más altas las que provocan las temperaturas superiores. En cuanto a los efectos regionales, las previsiones indican con mayor certidumbre que nunca se asemejarán a los patrones de cambio observados en los últimos 50 años (mayor calentamiento sobre los continentes que sobre los océanos, por ejemplo), pero con cambios de una magnitud mayor.

Las simulaciones indican también que la eliminación del exceso de dióxido de carbono de la atmósfera mediante procesos naturales en los continentes y en los océanos perderá eficiencia con el calentamiento progresivo del planeta. Merma que hará que un porcentaje más alto del dióxido de carbono emitido permanezca en la atmósfera, lo cual, a su vez, acelerará el calentamiento global. Se trata de una importante realimentación del ciclo del carbono (el intercambio de compuestos de carbono a través del sistema climático). Aunque los modelos coinciden en que el ciclo del carbono representa una realimentación positiva, el abanico de sus resultados sigue siendo muy amplio, ya que dependen, entre otras cosas, de los cambios que la vegetación o la absorción edáfica de carbono experimenten a medida que se calienta el clima, sobre lo cual se sabe aún poco. Una parte importante de las investigaciones abiertas se proponen disipar esa ignorancia.

Los modelos predicen también que el cambio climático afectará a las características físicas y químicas de los océanos. Las estimaciones del aumento del nivel del mar durante el siglo XXI van desde los 30 a los 40 centímetros, dependiendo de nuevo de las emisiones. Más de un 60 por ciento de este aumento obedecerá a la expansión térmica del océano. Sin embargo, esas evaluaciones basadas en modelos no tienen en cuenta la posible aceleración recientemente observada de la pérdida de hielo de las capas de Groenlandia y del continente antártico. Aunque el conocimiento científico de dichos efectos es muy limitado, parece que podrían añadir de 10 a 20 centímetros adicionales al aumento del nivel del mar, y no se pueden excluir aumentos significativamente mayores. También se verá afectada la química del mar, ya que el aumento de la concentración de dióxido de carbono atmosférico incrementará la acidez de los océanos.

Se prevé que algunos de los cambios principales afectarán a las regiones polares: habrá subidas notables de la temperatura terrestre en altas latitudes y aumentará la profundidad del deshielo de los subsuelos permanentemente helados; menguará la extensión del hielo marino veraniego en la cuenca ártica. Las latitudes más bajas experimentarán, probablemente, un mayor número de olas de calor, precipitaciones más copiosas y huracanes y tifones más fuertes (aunque quizá menos frecuentes). No está claro en qué medida se intensificarán los huracanes y tifones. Para elucidarlo se están emprendiendo nuevas investigaciones.

Cuestiones pendientes

Persisten incertidumbres importantes. Desconocemos el modo preciso en que responderán las nubes a medida que aumenten las temperaturas, que será uno de los factores esenciales que determinará la magnitud general del calentamiento. Sin embargo, la complejidad de las nubes ha frustrado los intentos de precisar cómo responderán al calentamiento; también aquí hay que investigar más.

Vivimos en una época en que tanto los seres humanos como la naturaleza moldearán la futura evolución de la Tierra y sus habitantes. Desgraciadamente, la bola de cristal de nuestros modelos climáticos se vuelve más borrosa para las predicciones a más de un siglo de distancia. Nuestro conocimiento limitado de la reacción de los sistemas naturales y de la sociedad humana a los crecientes efectos del cambio climático aumenta nuestra incertidumbre aún más. En cualquier caso, un resultado del calentamiento global está fuera de duda: las plantas, los animales y los seres humanos vivirán con las consecuencias del cambio climático durante al menos los próximos mil años.

Los autores

William Collins, Robert Colman, James Haywood, Martin R. Manning y Philip W. Mote participaron en el Grupo de Trabajo I de la evaluación de 2007 del PICC. Collins es profesor del departamento de ciencias planetarias y de la Tierra en la Universidad de California en Berkeley e investigador del Laboratorio Nacional Lawrence en Berkeley y del Centro Nacional de Investigación Atmosférica de Boulder, Colorado. Colman es investigador del Grupo de Dinámica Climatológica del Centro de Investigación de la Oficina Australiana de Meteorología, en Melbourne. Haywood es el jefe de investigación sobre aerosoles del Grupo de Investigación Basada en la Observación y del Grupo de Ecosistemas, Clima y Química de la Oficina Meteorológica de Exeter. Manning dirige la Unidad de Apoyo del Grupo de Trabajo I del PICC en el Laboratorio de Investigación de Sistemas Terrestres NOAA, en Boulder, Colorado, y Mote, climatólogo del estado de Washington, se halla adscrito al Grupo de Impactos Climáticos de la Universidad de Washington, en cuyo departamento de ciencias atmosféricas enseña.

Bibliografía complementaria

Todos los informes y resúmenes del PICC están disponibles en www.ipcc.ch